ChinaXiv合作期刊

doi:10.13866/j.azr.2019.01.25

基于光合有效辐射瞬时值估算日均值的方法①

张 璟[1,2]， 谢亚楠[1]， 汪鸣泉[2]， 王茂华[2]

(1. 上海大学,上海先进通信与数据科学研究院，特种光纤与光接入网重点实验室,上海 200000；
2. 中国科学院上海高等研究院，碳数据与碳评估中心,上海 200000)

摘 要：光合有效辐射是太阳辐射的一部分,是植被进行光合作用和陆地生态系统碳循环的核心因素,对估算植被生产力具有重要影响。本文基于 SURFRAD 多年观测数据,建立了一个线性回归模型,由上午、下午瞬时光合有效辐射值估算日均值。该模型模拟效果较好,单个观测站的均方误差低于 9 W·m^{-2},判定系数不低于 0.96,并适用于不同经纬度、气候条件和海拔高度下的区域,总的均方误差为 8.863 1 W·m^{-2}，判定系数 R^2 为 0.977,表明该模型和方法有较好的可行性和可靠性。

关键词：光合有效辐射；瞬时值；日均值；线性回归模型；方法研究

chinaXiv:201909.00111v1

光合有效辐射(PAR，photosynthetically active radiation)是太阳辐射在电磁波谱的可见光(400～700 nm)部分,是植被进行光合作用的那部分太阳辐射,是形成植物干物质的能量来源。作为一种重要的气候资源,是光合潜力、潜在产量和作物生长模拟研究、土壤碳固定模拟研究中不可缺少的基础数据[1]。另一方面,光合有效辐射还是水循环过程中生物蒸腾作用的主要控制因子,特别是在生物量和作物产量模式模拟研究中,光合有效辐射更是不可缺少的参数之一[2]。PAR 在光合作用中也扮演了重要的角色[3],在入射到地表的过程中,被植被吸收和贮存在生物质中。为了提高对光合作用和碳循环的模拟,PAR 的估算准确性非常重要,其精确测量有助于提高净第一性生产力(NPP)模型的准确率,促进 CO_2 源/汇研究[4-5]。因此,光合有效辐射研究在生态学、农学以及气候研究中都具有重要的意义和价值。

尽管光合有效辐射在生态系统模型应用中极具潜力,但它并不是气象站的常规观测项目。地面 PAR 可由地面太阳辐射(SSR,surface solar radiation)和辐射站的其他参数估算得到[6]。由于 SSR 和 PAR 存在较好的线性关系,经过校准的经验模型可以准确地来估算该区域的 PAR。但是这些经验模型的参数依赖于独立的辐射站,而不同的辐射站之间却不同,可能没有校准参数的区域 PAR 存在较大误差[7]。而且,地面太阳辐射观测站相较于其他常规的气象站点非常稀少,以地面太阳辐射站的 SSR 与经验模型估算 PAR 并进行空间地理插值获取区域上连续的 PAR,也带来了较大误差[8]。目前,全球 PAR 网格化产品空间分辨率都比较大,如 TOMS 卫星的 PAR 产品[9]、CERES 和 ISCCP_L 的 PAR 产品[10-11]等,空间分辨率都超过 100 km,而 MODIS 只有海洋 PAR 产品。

随着卫星观测技术的发展,以辐射传输模型为理论基础,陆续有各种适应特定传感器的 PAR 估算方法提出,在空间分辨率和精度上取得了较大的进展[12-15]。在时间分辨率上,中低分辨率的多光谱遥感卫星,一般每 1～2 d 甚至更久可获取一次全球综合信息,对于全球/区域的观测,遥感信息是一个瞬间信息。通过相应的模型和算法可估算 PAR 的瞬时值,而根据生态模型的输入要求,PAR 的日分布值更具有应用价值[16]。由 PAR 瞬时值估算日均值的方法较少,多数参考 SSR 日均值的估算方法,主要有以下几种:① 加入间隔时间,简单求均值[13];② 参考太阳辐射变化规律,将日均值与瞬时值建立三角函数关系[17-18],该方法在晴朗天气下应用较

---

① **收稿日期**：2018-05-02； **修订日期**：2018-06-15
基金项目：国家重点研发计划(2016YFA0602603,2016YFA0602602);国家自然科学基金(N51778601);中国科学院青年创新促进会基金资助
作者简介：张璟(1994-),女,硕士研究生,主要从事生态遥感研究. E-mail:zhangjing@sari.ac.cn
通讯作者：王茂华. E-mail:wangmh@sari.ac.cn

ChinaXiv合作期刊

好,在多云天气下效果较差;③ 将 PAR 简化为仅与太阳平均天顶角相关,该方法假设当地时间 10:30 代表了上午的天气情况,13:30 代表了下午的天气情况[19-20];④ 根据观测站多年数据,建立瞬时值与日均值的经验模型[21],该方法估算的辐射是 SSR,简单有效,也是笔者参考和改进的模型与方法,并应用于 PAR 日均值估算。

本文以美国国家海洋和大气管理局地面辐射网络的 7 个 PAR 辐射数据观测站为研究对象,利用 2006—2016 年的 PAR 观测数据,从时间尺度和空间覆盖范围上,探究 PAR 瞬时值与日均值,以及 PAR 理论值之间的估算模型。为从瞬时值估算日均值提供一种简单快捷较为精确的方法。瞬时时间参考搭载 MODIS 传感器的 Terra 和 Aqua 卫星过境时间当地时间——10:30 和 13:30。

1　研究数据和方法

1.1　研究数据来源

数据来源于美国国家海洋和大气管理局地面辐射网络[22](SURFRAD,Surface Radiation Budget Network),该辐射网络一共有 7 个观测站, 2008 年之前数据每间隔 3 min 记录 1 次,之后数据每隔 1 min 记录 1 次,单位为 $W \cdot m^{-2}$。该 PAR 辐射网络分布于美国 7 个州,主要位于中高纬度地区,详细的经纬度和海拔信息如表 1 所示。

表 1　SURFRAD 观测站信息

Tab.1　Basic information of the seven SURFRAD stations

数据站	纬度(°N)	经度(°E)	海拔/m	美国(州)	开始时间
Bondville	40.06	88.37	213	伊利诺伊州	1995-01
Fort Peek	48.31	105.10	634	蒙大拿州	1995-01
Goodwin Greek	34.25	89.87	98	密西西比州	1995-01
Table Mountain	40.125	105.237	1 689	科罗拉多州	1995-06
Desert Rock	36.626	116.018	1 007	内华达州	1998-03
Penn State	40.72	77.93	376	宾夕法尼亚州	1998-06
Sioux Falls	43.73	96.62	473	南达科他州	2003-06

对地观测领域中,MODIS 数据以其全球覆盖,较高的时间分辨率、多空间分辨率、多光谱分辨率以及免费的信息接受和产品服务政策,在目前研究全球尺度下大气、海洋和陆地生化过程应用非常广泛[23]。多种以辐射传输模型为理论基础的 PAR 估算方法,数据源多是 MODIS 数据,因此,本文选择的瞬时时间为搭载了 MODIS 传感器的两颗卫星 Terra 和 Aqua 的过境时间——当地时间 10:30 和 13:30,而实际上卫星数据获取时间 10:00—11:00 和 13:00—14:00,因此,本文假设卫星过境时间的瞬时值代表了该小时的平均情况。

1.2　研究方法与评价指标

通常情况,一天中 85% 的日辐射量在当地正午的前 2 h 至后 2 h 之间获得[24],因此,笔者提出一个简单有效的线性回归模型,根据当地时间 10:30 和 13:30 左右的瞬时值以及 PAR 大气上界理论值作为修正,来估算日均值。

$$PAR_{daily} = A_1 \cdot PAR_{morning} + A_2 \cdot PAR_{afternoon} + A_3 \cdot PAR_{theory} + A_4 \quad (1)$$

$$PAR_{theory} = A_0 \cdot SSR_{theory} \quad (2)$$

式中:PAR_{daily}、$PAR_{morning}$、$PAR_{afternoon}$ 分别为观测站的 PAR 日均值,上午瞬时值和下午瞬时值;PAR_{theory} 为大气上界 PAR 值,由大气上界太阳辐射值 SSR_{theory} 决定。$A_0 \sim A_4$ 为拟合系数。

PAR 作为太阳辐射的一部分,约占太阳总辐射能量的 50% 左右,在很多研究中由地面接收到的太阳辐射值和经验系数 0.48 或 0.5 直接获得,不同的经验模型系数[25-26]在 0.4 ~ 0.5 之间变动,在太阳辐射进入大气后,受云、水汽、气溶胶等因子的影响,太阳辐射经吸收、散射后减少;同理,PAR 值也产生变化。考虑到天气因素的影响,引入大气上界太阳日辐射量对线性回归模型进行修正,视为理论值。

$$SSR_{theory} = \int_{sunrise}^{sunset} E_{sc} dt \quad (3)$$

$$SSR_{theory} = \frac{24}{\pi} E_{sc} (r_0 / r)^2 \cdot \int_0^{\pi} (\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\tau) d\tau \quad (4)$$

chinaXiv:201909.00111v1

ChinaXiv合作期刊

式中：E_{sc}是太阳常数，值为 1 367 W · m^{-2}；r_0/r 是日地相对距离，与经纬度相关；δ、φ 和 τ 分别是当地的纬度、太阳赤纬和水平面日出时角，太阳赤纬和日出时角及经纬度相关。

相较于仅仅用瞬时值与日均值建立线性回归模型，引入不受天气情况影响的大气上界 PAR 理论值作为修正，可进一步提高模型的准确性，这也是笔者对上文所述线性回归估算模型的改进。模型采用的评价指标是均方误差 RMSE、偏差 MBE 和判定系数 R^2，公式如下：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(\mathrm{observed}_t-\mathrm{predicted}_t)^2} \quad (5)$$

$$\mathrm{MBE}=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(\mathrm{observed}_t-\mathrm{predicted}_t) \quad (6)$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{t=1}^{N}(\mathrm{observed}_t-\overline{\mathrm{observed}})^2}{\sum_{t=1}^{N}(\mathrm{observed}_t-\mathrm{predicted}_t)^2} \quad (7)$$

式中：$\mathrm{observed}_t$、$\mathrm{predicted}_t$是 t 时刻的观测值和模拟值；N 是样本个数。

2 结果与分析

2.1 PAR 瞬时值与日均值变化分析

实际上卫星数据获取时间在当地时间 10:00—11:00 和 13:00—14:00，所以，以观测站 10:00 和 13:00 1 min 频率下的小时均值代替瞬时值。PAR 观测数据的日均值由日出、日落时间内的 1 min 频率下的观测值求得。

PAR 受天气情况影响较大，无论是瞬时值还是日均值，日与日之间差异均较大，但总体呈现出冬春季低、秋夏季高的特征，季节变化明显。如图 1 所示，以 Bondville 观测站 2016 年 PAR 的瞬时值与日均值为例，PAR 日均值与瞬时值均波动较大，上午和下午的瞬时值总体处于 50～400 W · m^{-2}，日均值总体处于 20～160 W · m^{-2}，远低于瞬时值，因此，以瞬时值的天气情况代替上午、下午的天气情况，可能带来一定误差。全年 PAR 变化呈现出正弦函数的变化规律，其他观测站日均值年变化类似。

2.2 观测站数据模拟结果验证与分析

光合有效辐射主要受地理位置、海拔和天气情况影响，基于辐射传播模型的遥感估算方法考虑了上述影响因素估算出瞬时值。在此基础上，笔者探究由瞬时值估算日均值的线性回归模型是否受地理位置、海拔以及气候因素的影响。同上文所述，以观测站 10:00 和 13:00 在 1 min 频率下的小时均值代替瞬时值。PAR 观测数据日均值由日出、日落时间内的 1 min 频率下的观测值求得。

对每年的数据进行拟合后发现，同一个观测站不同年份的拟合系数非常接近，故认为该线性回归方程尽可能减少了气候影响，因此，对同一个数据站的拟合系数采用多年拟合系数的平均值。利用 11 a 观测数据对拟合结果进行验证，图 2 分别是 7 个站点的模型拟合结果，RMSE 和 MBE 的单位是 W · m^{-2}。

从图 2 可以看出，此线性回归方程应用于不同区域的单个光合有效辐射观测站，RMSE、MBE 和 R^2 均较小，其中 RMSE 均低于 10 W · m^{-2}，均大于 0.96，拟合结果较好，拟合系数如表 2 所示。

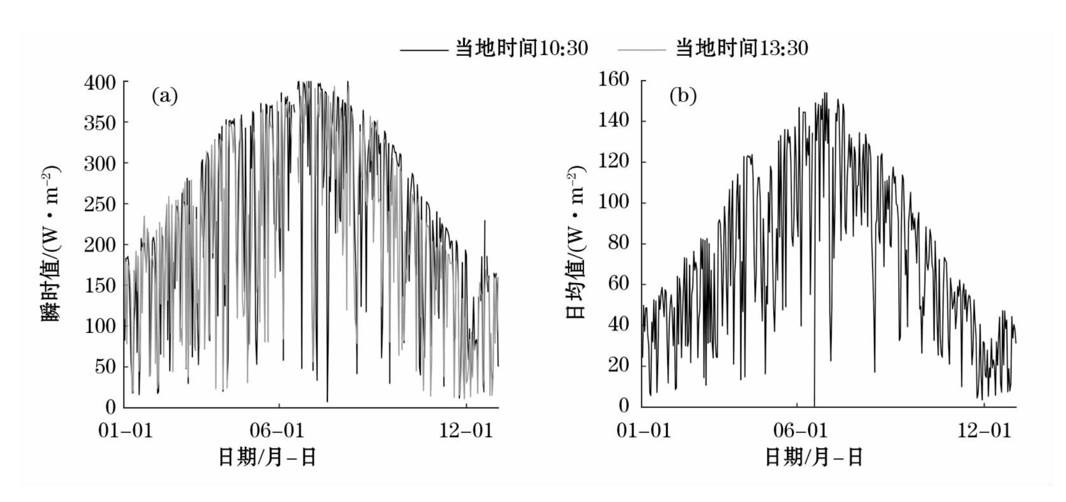


图 1 Bondville 观测站 2016 年 PAR 瞬时值与日均值变化

Fig. 1 Changes of PAR instantaneous and daily values at Bondville Station in 2016

chinaXiv:201909.00111v1

ChinaXiv合作期刊

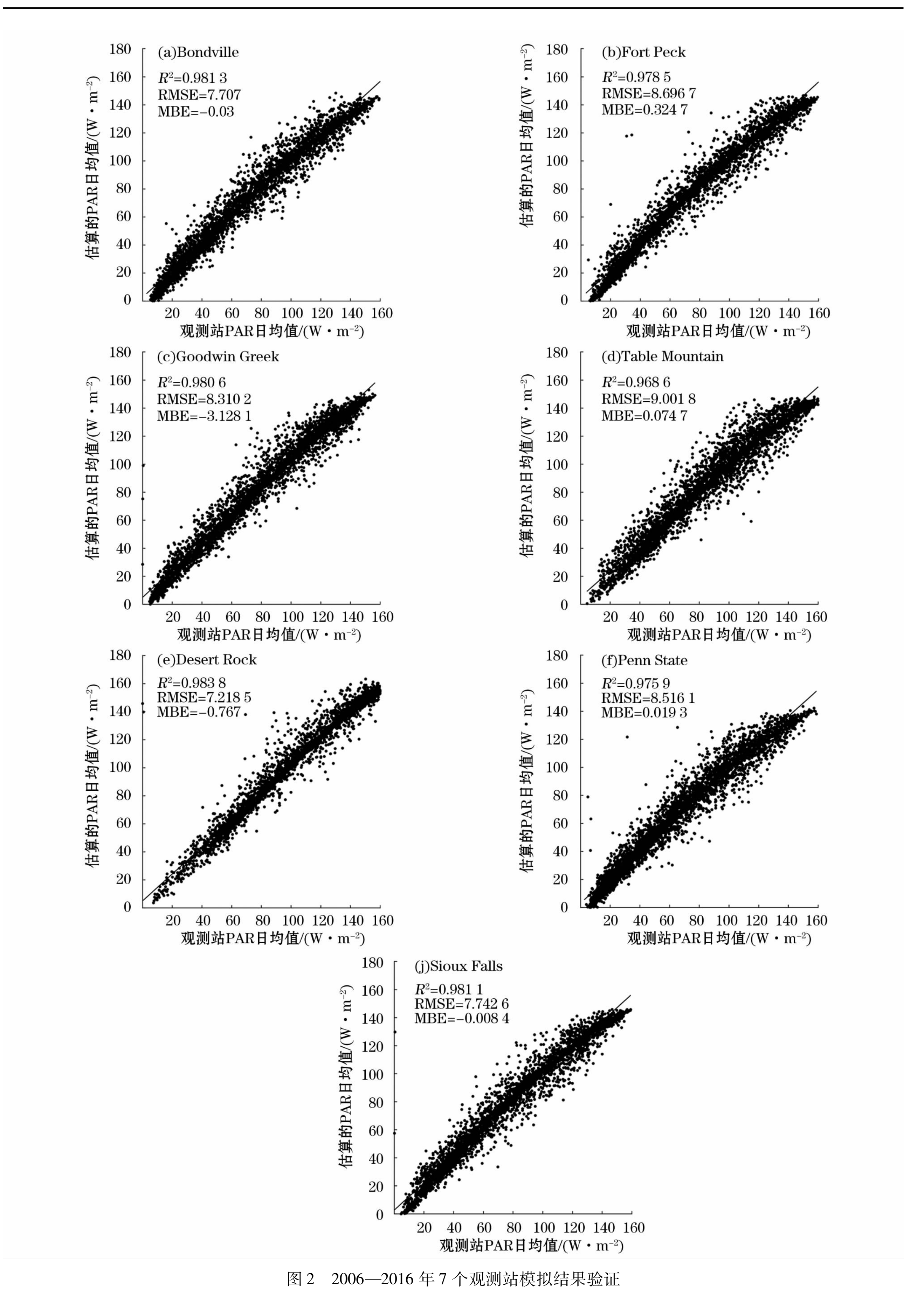


图 2　2006—2016 年 7 个观测站模拟结果验证

Fig. 2　Validation of the simulated results at seven SURFRAD stations during the period from 2006 to 2016

chinaXiv:201909.00111v1

ChinaXiv合作期刊

表 2 数据站拟合系数

Tab. 2 Fitting coefficients for the SURFRAD stations

数据站	拟合系数			
	A_1	A_2	$A_0 \times A_3$	A_4
Bondville	0.163 727 273	0.146 281 818	0.077 772 727	-19.573 545 5
Fort Peek	0.162 254 545	0.149 872 727	0.085 945 455	-18.340 763 6
Goodwin Greek	0.163 7	0.141 018 182	0.095 127 273	-22.742 227 3
Table Mountain	0.164 154 545	0.126 881 818	0.0909 454 55	-19.496 663 6
Desert Rock	0.150 118 182	0.141 8	0.122 045 455	-24.245 290 9
Penn State	0.157 990 909	0.149 772 727	0.069 427 273	-17.026 554 5
Sioux Falls	0.1573 090 91	0.160 418 182	0.078 827 273	-19.125 672 7
平均	0.159 893 506	0.145 149 351	0.088 584 416	-20.078 674

表 3 SURFRAD 观测站模拟结果

Tab. 3 Simulated results at the seven SURFRAD stations

	BON	FPK	GWN	TBL	DRA	PSU	SXF	全部
RMSE/(W·m^{-2})	7.707 9	8.696 7	8.310 2	9.001 8	7.218 5	8.516 1	7.742 6	8.863 1
MBE/(W·m^{-2})	-0.030 01	0.324 65	-3.128 1	0.074 703	-0.767 04	0.0193 02	-0.008 38	0.433 57
R^2	0.980 6	0.978 5	0.980 6	0.968 6	0.983 8	0.975 9	0.981 1	0.976 97

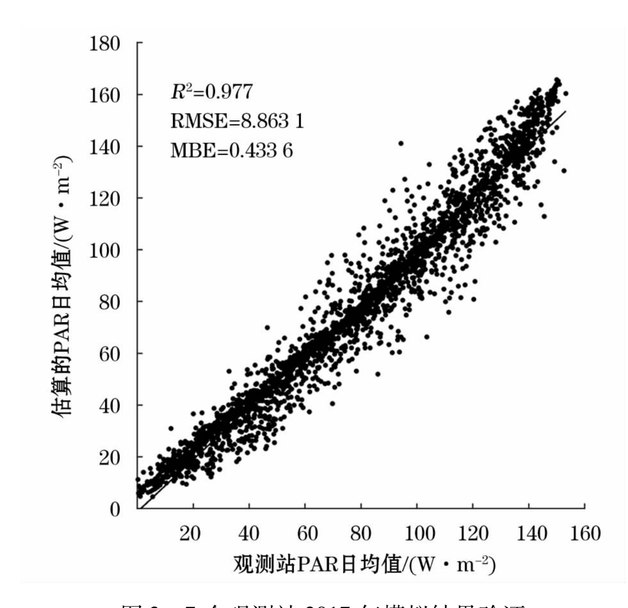


图 3 7 个观测站 2017 年模拟结果验证

Fig. 3 Validation of simulated results at seven SURFRAD stations in 2017

从表 2 可以看出,位于不同地理位置的多个观测站拟合系数也较接近,存在微小的差异。为探究该回归模型统一后的拟合系数是否适用于不同区域,笔者利用全部数据站多年拟合系数的平均值作为最终的拟合系数,应用于该模型中,输入 2017 年 7 个观测站上午、下午瞬时值数据估算日均值,并用观测值进行验证,多个数据站模拟验证结果如图 3 所示,误差分析如表 3 所示,RMSE 和 MBE 的单位是 W·m^{-2}。

从表 3 可以看出,该模型和固定的拟合系数应用于多种经纬度、海拔高度和气候条件下的观测站,拟合效果仍然较好,误差较小,RMSE 为 8.863 1 W·m^{-2},R^2 为 0.976 97。根据卫星遥感数据估算的瞬时 PAR 值,可以考虑应用此模型和系数,由上午、下午瞬时值估算日均值。

2.3 观测站数据模拟结果验证与分析

与其他方法相比,利用间隔时间求均值[13]方法,其在晴朗天气下的 RMSE 为 32.621 03 W·m^{-2},多云天气下的 RMSE 为 63.785 53 W·m^{-2},多种天气条件下的 RMSE 为 45.719 3 W·m^{-2};通过建立三角函数关系由瞬时值估算日均值的方法[18],其在多个区域 RMSE 范围为 33.6~147.1 W·m^{-2};仅利用上午和下午瞬时值建立估算模型的方法[21],其 RMSE 为 53.33 W·m^{-2};前 3 种方法的瞬时值由卫星数据估算而来,因为估算的瞬时值本身存在一定误差,所以,由这样的估算值作为瞬时值输入,在估算日均值时比利用观测站的瞬时值作为输入误差可能会偏大。

为了验证笔者所提出的线性回归模型以基于卫星数据估算的瞬时值为输入,估算日均值是否准确有效,基于辐射传播模型[14]和 MODIS 卫星数据估算了上午和下午的瞬时值。该辐射传播模型由唐文俊等在 2017 年提出,考虑多种气候条件因素,整体误差较小。验证数据为观测站过境时间小时平均数据,验证结果如图 4 所示,RMSE 和 MBE 的单位是

chinaXiv:201909.00111v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201909.00111v1

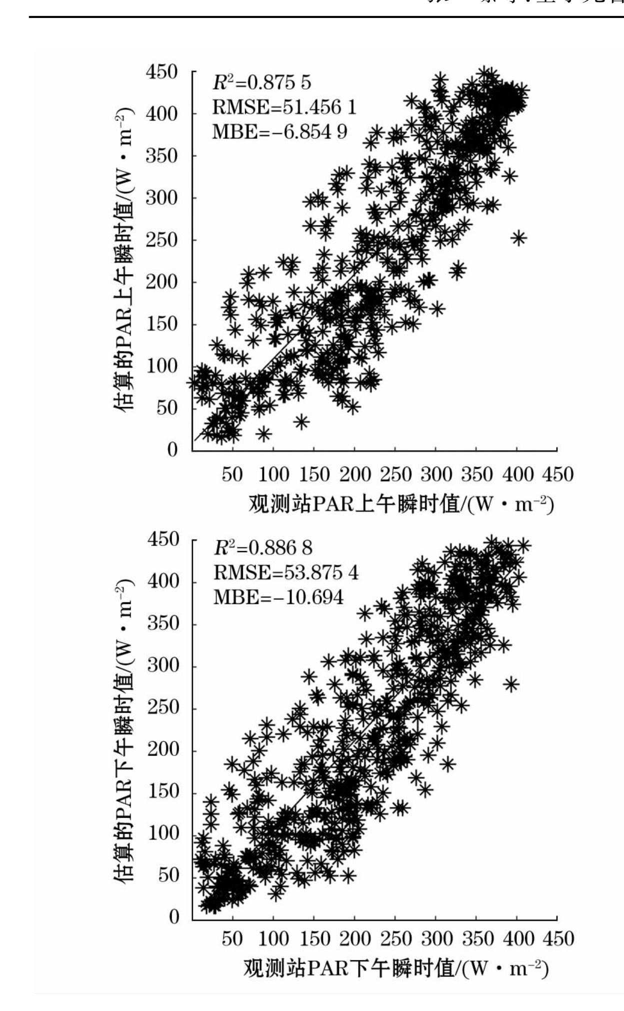


图 4　Bondville 观测站范围基于 MODIS 数据估算的瞬时值验证结果

Fig. 4　Validated results of the instantaneous values estimated by MODIS data at Bondville Station during the period from 2015 and 2016

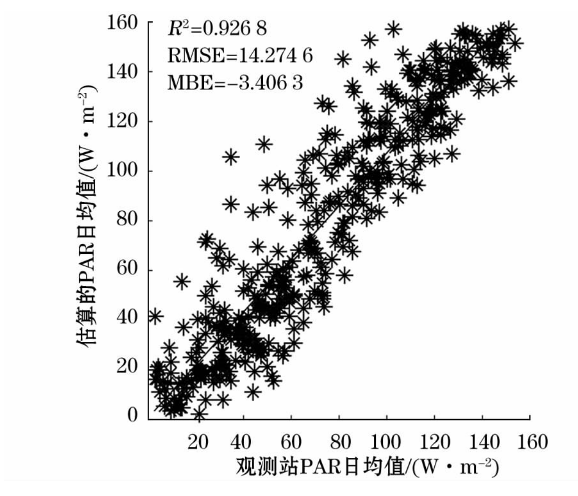


图 5　基于估算的瞬时值和线性回归模型估算的日均值验证结果

Fig. 5　Validated results of the estimated instantaneous values and the daily values based on the linear regression model

$W\cdot m^{-2}$。

如图 4 所示,由卫星数据和辐射传播模型估算的上午、下午瞬时值存在一定的估算误差,但误差尚在合理范围内。因为 PAR 的影响机制复杂,一方面误差来源于 MODIS 数据估算 PAR 时所采用的方法本身存在的误差;另一方面来源于 MODIS 多个数据产品,在云天气情况下多种产品存在大量缺失值,需要通过其他数据如 MODIS 的月均值和美国国家环境预报中心(NCEP)再分析资料进行插值填充。估算的卫星瞬时值作为本文提出的线性回归模型的输入来估算日均值,探究在输入的瞬时值存在一定误差的情况下,结合上午、下午瞬时值,引入理论值进行修正后,验证本文提出的线性回归模型效果。验证数据为观测站日均值,模拟结果如图 5 所示,RMSE 和 MBE 的单位是 $W\cdot m^{-2}$。

从图 4 和图 5 可以看出,即使在估算的瞬时值存在一定误差的情况下,利用本文提出的线性回归模型和拟合系数依旧很好地估算出了较为准确的日均值,RMSE 为 14.274 6 $W\cdot m^{-2}$,R^2 为 0.926 82。而上文所述的将 PAR 简化为仅与太阳平均天顶角相关求日均值的方法[14],其输入的瞬时值由卫星数据和辐射传播模型估算而来时,RMSE 为 14.6 $W\cdot m^{-2}$,MBE 为 3.7 $W\cdot m^{-2}$,R^2 为 0.92,与本文模型的验证结果基本持平,但考虑到其应用的是 2008 年与 2009 年数据,而且在辐射传播模型中及其所用遥感数据本身存在误差,所以,误差总体来源于卫星估算的瞬时 PAR;其输入的瞬时值来源于观测站时,RMSE 为 11.9 $W\cdot m^{-2}$,MBE 为 2.7 $W\cdot m^{-2}$,R^2 为 0.94,总体低于本文采用的线性回归模型估算方法结果,RMSE 为 8.863 1 $W\cdot m^{-2}$,MBE 为 0.433 57 $W\cdot m^{-2}$,R^2 为 0.976 97。由此可见,本文提出的线性回归模型是可靠的,可以简单、有效、准确地根据瞬时值估算 PAR 日均值。

3　结 论

本文基于 SURFRAD 地面辐射观测网络中不同经纬度分布、海拔高度下的 7 个观测站 2006—2016 年 PAR 数据,分析了一年内的 PAR 日均值变化和多年年均值变化,日均值在 20 ~160 $W\cdot m^{-2}$。除位于高海拔的 TBL 观测站年均值在 100 ~105 $W\cdot m^{-2}$,其他观测站年均值在 62 ~85 $W\cdot m^{-2}$,波动较小。可以看出 PAR 日均值变化较大,年均值变化较

ChinaXiv合作期刊

平稳,但是季节规律明显,冬春季低、夏秋季高。

以辐射传输模型为理论基础,利用遥感卫星数据估算瞬时 PAR 的方法逐渐成熟。由瞬时值估算日分布值,笔者提出一种简单、有效的线性回归模型,根据 PAR 瞬时值以及大气上界 SSR 值估算 PAR 日均值,效果良好。单个观测站的模拟结果 RMSE 值均低于 10 W·m^{-2},最高为 9 W·m^{-2}左右,R^2 均高于 0.96,最低为 0.968 6。应用该方法对 2017 年 7 个观测站数据进行估算并验证,模拟结果显示 RMSE 为 8.863 1 W·m^{-2},MBE 为 0.433 57 W·m^{-2},R^2 为 0.976 97。

本文建立的估算模型仅根据 PAR 上午、下午的瞬时值及与跟经纬度相关的大气上界 SSR 理论值进行估算,简化了模型。模拟结果显示,该模型具有良好的可行性和可靠性,在由瞬时值估算日均值的过程中不考虑地形、经纬度分布和气候条件的影响,可以考虑大范围应用。

综上所述,本文基于 SURFRAD 地面辐射观测网络数据建立了线性回归模型,由 PAR 上午、下午瞬时值估算日均值,避免再次考虑地理区域、气候情况和海拔高度等因素的影响,减少了传统方法的误差。无论是基于观测站的瞬时值数据,或者基于辐射传播模型和卫星数据估算的瞬时值数据,均可以准确有效地估算出日均值。为后续大范围基于遥感数据估算瞬时 PAR 值后估算日均值提供了可行可靠的方法。结合遥感数据估算 PAR 日均值对研究植被碳循环具有重要的意义,有助于进一步提高植被净生产力估算模型的准确性。

参考文献(References):

〔1〕 Mccree K J. Photosynthetically Active Radiation〔M〕. Springer Berlin Heidelberg:Physiological Plant Ecology I,1981:41-55.

〔2〕 Liu C,Dong X,Liu Y. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu,China〔J〕. Catena,2015,125:190-199.

〔3〕 Gitelson A A,Peng Y,Arkebauer T J,et al. Productivity,absorbed photosynthetically active radiation, and light use efficiency in crops:Implications for remote sensing of crop primary production〔J〕. Journal of Plant Physiology,2015,177:100-109.

〔4〕 Munir T M,Perkins M,Kaing E,et al. Carbon dioxide flux and net primary production of a boreal treed bog:Responses to warming and water-table-lowering simulations of climate change〔J〕. Biogeosciences,2015,12(4):1-21.

〔5〕 Allen M F,Kitajima K. Net primary production of ectomycorrhizas in a California forest〔J〕. Fungal Ecology,2014,10(8):81-90.

〔6〕 Tang W,Qin J,Yang K,et al. Reconstruction of daily photosynthetically active radiation and its trends over China〔J〕. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118 (23): 13 292-13 302.

〔7〕 Yu X,Wu Z,Jiang W,et al. Predicting daily photosynthetically active radiation from global solar radiation in the Contiguous United States〔J〕. Energy Conversion & Management,2015,89:71-82.

〔8〕 Zhang X,Liang S,Zhou G,et al. Generating global land surface satellite incident shortwave radiation and photosynthetically active radiation products from multiple satellite data〔J〕. Remote Sensing of Environment,2014,152:318-332.

〔9〕 Eck T F,Dye D G. Satellite estimation of incident photosynthetically active radiation using ultraviolet reflectance.〔J〕. Remote Sensing of Environment,1991,38(2):135-146.

〔10〕 Pinker R T,Laszlo I. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale〔J〕. Journal of Applied Meteorology,1992,31(2):194-211.

〔11〕 Su W,Charlock T P,Rose F G,et al. Photosynthetically active radiation from clouds and the earth's radiant energy system (CERES) products〔J〕. Journal of Geophysical Research,2007,112:G02022.

〔12〕 Qin J,Yang K,Liang S,et al. Estimation of daily mean photosynthetically active radiation under all-sky conditions based on relative sunshine data〔J〕. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2012,51:150-160.

〔13〕 Li L,Xin X Z,Zhang H L,et al. A method for estimating hourly photosynthetically active radiation (PAR) in China by combining geostationary and polar-orbiting satellite data〔J〕. Remote Sensing of Environment,2015,165:14-26.

〔14〕 Tang W,Qin J,Yang K,et al. An efficient algorithm for calculating photosynthetically active radiation with MODIS products〔J〕. Remote Sensing of Environment,2017,194:146-154.

〔15〕 Sun Z,Liu J,Zeng X,et al. Parameterization of instantaneous global horizontal irradiance:Cloudy-sky component〔J〕. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2012,117(D14):202-211.

〔16〕 Wang L,Gong W,Feng L,et al. Estimation of hourly and daily photosynthetically active radiation in Inner Mongolia,China,from 1990 to 2012〔J〕. International Journal of Climatology,2015,35(10):3 120-3 131.

〔17〕 Bisht G,Bras R L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions:Southern great plains case study〔J〕. Remote Sensing of Environment,2010,114(7):1 522-1 534.

〔18〕 Roupioz L,Jia L,Nerry F,et al. Estimation of Daily Solar Radiation Budget at Kilometer Resolution over the Tibetan Plateau by Integrating MODIS Data Products and a DEM〔J〕. Remote Sensing,2016,8(6):504.

〔19〕 Wang H,Pinker R T. Shortwave radiative fluxes from MODIS:Model development and implementation〔J〕. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2009,114(D20):1-17.

chinaXiv:201909.00111v1

ChinaXiv合作期刊

〔20〕 Wang D, Liang S, He T, et al. Estimation of Daily Surface Shortwave Net Radiation From the Combined MODIS Data〔J〕. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(10): 5 519 – 5 529.

〔21〕 Tang B H, Li Z L, Wu H, et al. Estimation of daily net surface shortwave radiation from MODIS data〔J〕. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015: 25 – 28.

〔22〕 Augustine J A, Hodges G B, Cornwall C R, et al. An update on Surfrad: The GCOS surface radiation budget network for the continental United States〔J〕. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2005, 22(10): 1 460 – 1 472.

〔23〕 李贵才. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究〔D〕. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2004.〔Li Guicai. Estimation of Chinese Terrestrial Net Primary Production Using LUE Model and MODIS Data〔D〕. Beijing. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2004.〕

〔24〕 Mcarthur L J B, Hay J E. A technique for mapping the distribution of diffuse solar radiation over the sky hemisphere〔J〕. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20(4): 421 – 429.

〔25〕 Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satelliteand surface data〔J〕. Global Biogeochem Cycles, 1993, 7: 811 – 841.

〔26〕 Schiller K. Derivation of photosynthetically available radiation from METEOSAT data in the German Bight with neural nets〔J〕. Ocean Dynamics, 2006, 56: 79 – 85.

Estimation of Daily Value from PAR Instantaneous Value

ZHANG Jing[1,2], XIE Ya-nan[1], WANG Ming-quan[2], WANG Mao-hua[2]

(1. *Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai Institute of Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai* 200000, *China*;
2. *Shanghai Carbon Data Research Center, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200000, *China*)

Abstract: Photosynthetically active radiation (PAR) commonly refers to solar radiation in the visible (400 – 700 nm) part of the electromagnetic spectrum. Despite its potential and critical application in terrestrial ecosystem modelling, surface PAR is not typically a routine observation at meteorological station. Remote sensing can be used to derive the spatiotemporally continuous instantaneous PAR, but the researches about daily PAR estimation are deficient, and their accuracy cannot be guaranteed. In this paper, a linear regression model was developed to calculate the daily PAR based on Surface Radiation Budget Network (SURFRAD) data through the instantaneous and theoretical PAR. The results indicated that the model was effective with root mean square errors (RMSE) about 8.863 1 $W \cdot m^{-2}$, with coefficient of determination (R^2) about 0.977 without the limitations of areas.

Key words: photosynthetically active radiation; instantaneous value; daily value; linear regression model; method research

chinaXiv:201909.00111v1